LA MISSION PHARAO/ACES ET L'EFFET ALLAIS

Russell Bagdoo
rbagdoo@yahoo.ca

RÉSUMÉ

La théorie de la relativité d'Einstein sera mise à l'épreuve dans un environnement de microgravité par Atomic Clock Ensemble in Space (ACES), mission de l'agence spatiale européenne (ESA) développée par les laboratoires scientifiques français sous maîtrise d'œuvre du Centre National D'Études Spatiales (CNES). Le Projet d'Horloge Atomique par Refroidissement d'Atomes en Orbite (PHARAO) est l'élément central de la mission européenne ACES constituée de plusieurs horloges atomiques. L'horloge à atomes froids sera installée en 2013 pendant 18 mois à l'extérieur du module européen Columbus de la Station spatiale internationale (ISS) et rapportera des données avec une exactitude beaucoup plus élevée que ce qui est accessible avec la gravité terrestre. La physique théorique, la métrologie et la conception de l'horloge atomique seront toutes partantes pour bénéficier de ce partenariat. Notre souhait est que ACES puisse inclure *l'effet d'éclipse Allais* dans son programme d'application. Cet effet est lié à une déviation exceptionnelle et inexpliquée du mouvement du pendule lors d'éclipses solaires. Pharao fournirait un moyen unique de chercher dans un référentiel d'éclipse une éventuelle variation de la constante G. La comparaison entre l'horloge spatiale et celles disponibles sur Terre, qui fonctionnent sur des transitions différentes et qui dépendent de façons diverses des constantes fondamentales, permettrait, pendant l'intervalle de temps de l'éclipse, de découvrir si le potentiel gravitationnel et la vitesse des stations terrestres sont toujours constants, si le principe d'équivalence comporte une faille.

Au cours de l'éclipse totale de Soleil du 30 juin 1954, il a été observé une déviation brutale du plan d'oscillation d'un pendule paraconique, inexplicable par les théories admises. C'est ce qu'affirmaient en substance les communications de l'expérimentateur Maurice Allais publiées de 1957 à 1959 dans les *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*. Depuis lors, cette surprenante observation de l'effet Allais, considérée comme hérétique par la majorité des scientifiques dont certains allèrent jusqu'à vouloir en empêcher la diffusion, n'a cessé d'alimenter d'âpres controverses. Or il se trouve que des découvertes de la recherche spatiale ainsi que de récents développements de mesures mettant en jeu la phase atomique, telles les horloges atomiques à fontaine, pourraient apporter une réfutation, ou une confirmation, indiscutable sur ce phénomène aberrant venant démentir la relativité.

LE PRINCIPE D'ÉQUIVALENCE FAIBLE ET FORT

Galilée avait découvert que tous les objets tombaient à la même vitesse et subissaient la même accélération, quelle que soit leur masse ou leur composition. Il avait aussi montré que les lois physiques étaient les mêmes dans deux référentiels en mouvement rectiligne uniforme. Einstein étendit ce « principe d'équivalence » à tous les types de mouvements. Il montra qu'un observateur aveugle ne peut pas savoir s'il est dans un champ de gravitation ou dans un ascenseur en accélération dans un espace vide de toute autre masse. Donc, la gravitation et l'accélération sont les deux facettes du même phénomène. Tant qu'on ne

considère que les Lois de la mécanique, il existe des référentiels dans lesquels les corps se comportent comme si la gravité était absente. Einstein étendit alors ce principe et supposa que, dans un référentiel en chute libre, toutes les lois de la physique se comportent comme si la gravité était absente. Cette hypothèse, aujourd'hui baptisée « principe d'équivalence d'Einstein », est le lien entre la relativité restreinte et la relativité générale qu'Einstein développera en 1915 [1, 2].

Selon Einstein, la gravitation n'est pas une force. C'est la manifestation de la structure même de l'espace-temps, courbé par la présence de matière − ou d'énergie − en son sein. L'espace-temps est le tissu de l'Univers, il possède trois dimensions d'espace unies à une dimension temporelle. Dans la conception newtonienne d'un espace absolu à trois dimensions, une masse comme le Soleil produit une force d'attraction qui incurve les trajectoires des planètes. Dans la théorie d'Einstein, une planète ne subit aucune force, elle est libre et se déplace d'un point à un autre selon le chemin le plus court : sa trajectoire est une géodésique de l'espace-temps courbée par la masse du Soleil. En somme, Einstein géométrisa la gravitation.

Cependant, depuis près d'une quarantaine d'années, une course contre la montre est engagée pour tester le principe d'équivalence avec une précision toujours plus fine et, par voie de conséquence, la théorie de la relativité générale, avec l'espoir d'y détecter une faille et de découvrir une physique nouvelle. Tester le principe d'équivalence revient à vérifier que la force gravitationnelle est en réalité la manifestation d'un effet « géométrique » lié à la courbure de l'espace et du temps. Cette idée fondamentale (d'Einstein) découle directement du fait que tous les corps sont accélérés de la même façon dans un champ gravitationnel [3].

Pour comprendre comment Einstein en vint à géométriser la gravitation, il faut revenir à la notion de masse qui intervient dans deux phénomènes distincts : la gravitation et l'inertie. Dans le premier cas, on parle de « masse grave », celle qui apparaît dans la loi de la gravitation universelle. Elle mesure la force avec laquelle un corps attire ou est attiré par d'autres corps**.** En fait, il existe deux types de masses gravitationnelles. Il nous faut en toute rigueur distinguer la masse qui crée le champ de gravitation, appelée masse gravitationnelle *active* (par exemple la masse de la Terre M) de la masse sur laquelle le champ agit, appelée masse gravitationnelle *passive* (la masse m_g d'un corps qui tomberait dans le champ gravitationnel terrestre).

Dans le second, on parle de « masse inerte » : elle mesure la résistance d'un corps au changement de son état de mouvement. Dans le cadre de la théorie newtonienne, il n'y a *a priori* aucune raison pour que la réaction d'un corps à l'attraction gravitationnelle soit identique à la résistance qu'il oppose à un changement de son mouvement. Mais dès l'époque de Newton, des expériences suggéraient que les deux masses étaient équivalentes. Cette propriété a été, depuis, maintes fois confirmée expérimentalement avec une très grande précision [4].

La théorie newtonienne n'avait que faire de la distinction entre masse gravitationnelle active et passive : ces deux masses jouent le même rôle dans l'expression de la force de gravitation, en accord avec une autre des grandes lois newtoniennes, le principe de l'action et de la réaction. Mais la structure de la théorie einsteinienne est différente : la masse active y courbe l'espace-temps, dans lequel une masse passive suit une des géodésiques (les lignes les plus courtes). On distingue en conséquence le principe d'équivalence faible, qui postule l'équivalence entre masse inerte et masse gravitationnelle passive, et le principe

d'équivalence fort, qui postule l'identité des *trois* masses. Ce dernier statue que les lois de physique sont les mêmes partout et tout le temps dans l'univers observable, malgré n'importe quels effets de mouvement ou la gravité. C'est le principe fort qui est nécessaire à la cohérence de la théorie de la relativité générale [3, 5].

L'égalité entre masse inerte et masse gravitationnelle passive, déjà bien vérifiée par Newton, est effectivement l'un des résultats expérimentaux les plus précis de la physique actuelle : la différence entre les valeurs de m_i/m_g pour des matériaux différents est inférieure à 1 dix-milliardième (10^{-10}). Elle résulte des expériences d'Eötvös à la fin du siècle dernier et au début du XXe siècle, qui ont aussi beaucoup influencé Einstein dans l'établissement du principe d'équivalence et la construction de la relativité générale. Ce type d'expérience a été depuis quelques années repris avec vigueur par un grand nombre d'équipes.

La vérification du principe d'équivalence fort est plus difficile. Il faut qu'un même corps joue les deux rôles actif et passif, ce qui amène à considérer un système de trois corps et relève de l'astronomie. On peut ainsi comparer les accélérations de la Terre et de la Lune vers le Soleil. Une expérience de ce type est maintenant rendue possible parce que les mouvements relatifs de la Lune et de la Terre peuvent être connus avec une grande précision. On mesure le temps de trajet aller-retour d'un faisceau laser envoyé depuis la Terre et réfléchi par des réflecteurs. De tels réflecteurs ont été placés sur la Lune entre 1969 et 1974 par les astronautes des missions Apollo et Luna. La distance Terre-Lune est ainsi connue au centimètre près ! [4] C'était un test impressionnant pour vérifier le principe d'équivalence fort, mais il y a un inconvénient : les masses n'ont pas été testées pendant une éclipse solaire ou lunaire et la possibilité très forte demeure que des corps célestes se comportent différemment dans un cadre d'éclipse.

LE PRINCIPE D'ÉQUIVALENCE ET L'EFFET ALLAIS

Maurice Allais, polytechnicien et ingénieur du corps des mines, prix Nobel de Sciences économiques 1988 mais taillé pour la physique, constata, lors des deux éclipses totales de Soleil du 30 juin 1954 et du 2 octobre 1959, une influence lunisolaire anormale qui s'est manifestée sous la forme de perturbations remarquables du mouvement de l'azimut du pendule paraconique. Le plan d'oscillation s'est déplacé brutalement d'environ 15 grades (1,11 grade = 1 degré) au moment de l'éclipse du 30 juin 1954. Une perturbation analogue d'une amplitude de l'ordre de 10 grades a été constatée lors de l'éclipse totale de Soleil du 2 octobre 1959 qui n'a été que partielle à Paris. Dans ses recherches expérimentales et théoriques, il a mis en évidence ces anomalies très significatives (et quelques autres) et en a démontré l'existence indépendamment de tout effet pervers. Elles sont totalement inexplicables par les théories actuellement admises [6].

Ainsi, à moins que le principe d'équivalence fort ne soit strictement correct pendant un cadre d'éclipse, la possibilité demeure que la gravité interagisse différemment avec elle-même − avec l'énergie gravitationnelle qui lie le Soleil, la Terre, la Lune ensemble, par exemple – plutôt qu'avec d'autres manifestations d'énergie. Vérifier cette question devrait susciter l'une des expériences les plus intéressantes de la relativité générale, d'autant plus que les scientifiques ont amélioré la méthode de télémétrie laser depuis Apollo.

En tout état de cause, Amar Djema, correspondant Internet, suggère que l'horloge atomique par refroidissement d'atomes en orbite pourrait constater avec une grande précision, au cours d'éclipses solaire et lunaire. Embarquée dans l'ISS à l'horizon 2013 dans le cadre du projet

européen ACES, Pharao, qui associe la micropesanteur et des techniques de refroidissement d'atomes de césium par laser, sera la première horloge atomique à atomes froids de césium dans l'espace qui mesurera le temps avec une exactitude et une stabilité jamais atteintes à ce jour : elle ne perdra qu'une seconde au terme de 300 millions d'années. Le fonctionnement d'une horloge atomique repose en effet sur sa capacité à maîtriser au mieux la vitesse des atomes. Or la mesure du temps est d'autant plus précise que cette vitesse est lente. Par ailleurs, la vitesse des atomes est influencée par la pesanteur. Une contrainte dont Pharao s'affranchit en étant placée en orbite : les atomes sont ainsi ralentis jusqu'à la vitesse de l'escargot. Une horloge d'une telle précision trouve de nombreuses applications en physique fondamentale. Elle servira à vérifier certains principes de la théorie de la relativité générale avec une précision inégalée, à chercher une nouvelle physique et de nouvelles interactions au-delà des quatre déjà connues.

L'un des objectifs scientifiques de la mission est d'effectuer des tests sur le principe d'équivalence. Il sera possible de tester l'invariance locale de Lorentz et l'invariance de la position locale avec une précision sans précédent en effectuant trois types de tests : décalage gravitationnel vers le rouge, dérive de la constante de structure fine et anisotropie de la lumière. Hormis ces principaux objectifs, plusieurs objectifs secondaires peuvent être trouvés. Par exemple, si la théorie de la relativité générale est considérée comme exacte, alors les mesures du décalage gravitationnel vers le rouge peuvent être utilisées pour calculer les différences gravitationnelles potentielles entre diverses locations d'horloge. Il s'agit d'un nouveau type de mesures géodésiques qui utilisent des horloges, appelé géodésie relativiste [7, 8].

Jusqu'à présent, les données issues de la télémétrie laser-lune laissent entendre avec un haut degré de précision que la constante du paramètre de couplage gravitationnel G est bien une constante. Mais serait-elle accréditée dans un cadre d'éclipse solaire ou lunaire ? Lors d'une éclipse de Soleil, par exemple, lorsque la Lune se trouve entre le Soleil et la Terre, il y a souvent une brusque perturbation, comme si la chute libre de la Lune autour de la Terre avait envie de prendre la tangente de la géodésique solaire pour s'aiguiller autour du Soleil. Bien que ces perturbations semblent n'être que des brisures momentanées de symétrie (c'est déjà cela), elles ne peuvent pas ne pas affecter le tenseur métrique qui représente le champ de gravité de la relativité générale.

La tendance semble être de tester la théorie de la relativité générale dans l'espoir de prendre en défaut le principe d'équivalence à un niveau très faible, de l'ordre de 10^{-16}, 10^{-17}, voire moins encore. Une violation de principe d'équivalence constituerait un premier indice expérimental en faveur des théories actuelles dites d'unification qui tentent d'intégrer la gravitation dans un schéma englobant les quatre forces connues actuellement. Ces théories (la théorie des supercordes par exemple) prévoient l'existence de champs supplémentaires à celui de la relativité générale, pour autant que cette dernière ne serait pas remise en cause. En quelque sorte, une cinquième force qui se rajoute au champ de gravitation habituel [3]. Cette approche permettra, espère-t-on, de voir comment G évolue dans le temps et comment la gravité peut explorer la possibilité d'un commencement du temps. D'autre part, l'approche dans un cadre d'éclipse d'une légère modification de la gravité, perçue par la télémétrie laser-lune ou par l'horloge atomique, qui associe la micropesanteur et des techniques de refroidissement d'atomes de césium par laser, pourrait bien être deux rares façons de détecter à l'échelle macroscopique une faille du principe d'équivalence, pierre angulaire de la relativité générale.

Selon l’assertion de Newton, la Lune et la Terre sont accélérées vers le Soleil de façon identique si elles sont situées à la même position. Mais est-ce que l’égalité entre masse inerte et masse gravitationnelle passive, déjà bien vérifiée par Newton et par les expériences d’Eötvös, tient toujours dans un cadre d’éclipse ? Les perturbations décelées par le pendule paraconique Allais incitent à penser que cette capacité d’un corps à exercer une action à distance sur un autre pourrait dépendre de la nature même des corps : si, par exemple, la Terre et la Lune n’ont pas la même composition, pourquoi devraient-elles réagir de la même manière avec le Soleil ? Il semble que l’égalité entre la masse inertielle ($F = M_i \times a$) et la masse gravitationnelle (masse pesante) érigée en postulat par Newton, puis en principe universel par Einstein, ne va absolument pas de soi au stade de l’éclipse.

Pire pour ce qui est du principe d’équivalence fort, qui stipule l’identité des *trois* masses. Nous avons vu que M. Allais détecta lors de deux éclipses totales de Soleil en 1954 et en 1959 une déviation du plan d'oscillation d’un pendule paraconique qui était destiné à étudier l’effet Foucault. Il apparaît que lorsque le Soleil, la Lune et la Terre sont alignés, la Terre et la Lune ne sont pas accélérées de façon identique dans le champ gravitationnel du Soleil. L’étude des mouvements des corps célestes dans un référentiel d’éclipse constitue un laboratoire céleste qui devrait renseigner sur la manière dont les corps célestes se couplent entre eux et sur la manière dont la gravité se couple à elle-même. Ainsi, près et sur la ligne d’une éclipse solaire, au point tangentiel des courbures d'espace-temps des masses gravitationnelles actives (Terre pour la Lune ; Soleil pour la Terre), il se produit un jeu successif de répulsion et d’attraction qui traduit une soudaine confusion des genres de masse. Comme si la passive Lune semblait brusquement se prendre pour une planète active du Soleil, ce qui entraîne une répulsion solaire, puis alternait pour ajouter son poids à la Terre qui semble accélérer davantage vers le Soleil. L’effet Allais est-il une violation intrinsèque d’une symétrie spécifiquement gravitationnelle qui causerait une brèche dans cette propriété qu’on appelle l’universalité de la chute libre ?

Comment savoir, puisque les expériences de M. Allais et leur interprétation n’ont pas été pas prises au sérieux par la communauté physique ? Saxl et Allen (1970) ont tenté une approche différente de la même expérience, qui n’a jamais pu être retentée par la suite et reste donc non validée. Wang *et al*. effectuèrent des expériences en 1997 dans une région reculée de la Chine lors d’une éclipse solaire totale et, en 2001 et 2002, lors d’éclipses solaires en Zambie et en Australie. Même s’il y avait la possibilité d’un effet gravitationnel anormal, ils soutinrent que les mouvements de masses d’air induits par les changements de température étaient suffisants pour expliquer l’anomalie observée. Huit gravimètres et deux pendules furent déployés dans six sites d’observation en Chine pour l’éclipse solaire du 22 juillet, 2009 [9]. L’un des scientifiques impliqués prétendit dans une interview avoir observé un effet Allais, le résultat ne fut cependant pas publié dans une revue scientifique officielle. Diverses expériences non seulement avec le pendule paraconique et le pendule de Foucault, mais aussi avec le pendule à torsion et le gravimètre ont déjà été consacrées à la traque des perturbations. Les observations sont toutefois rares et plutôt contradictoires, à cause de la rareté de telles éclipses et, également, parce qu’un protocole d’expérimentation rigoureux doit être respecté. Les résultats du prof. Allais ont peu à voir avec les interprétations douteuses issues d’une épidémie de pendules anachroniques, versions jouet yoyo du pendule Allais. L’annonce de la vérification par la NASA de l'effet Allais, avant et immédiatement après l’éclipse du 11 août 1999, attira fortement l’attention des médias, mais aucune analyse approfondie des résultats ne fut publiée. Depuis 1954, des fluctuations ont été mesurées pendant environ vingt éclipses solaires totales, mais les résultats restent peu concluants. Désespérant ? Disons que ces

difficultés soulignent à quel point la mesure des anomalies durant les éclipses, notamment avec les pendules, est un art balbutiant.

L'EXPÉRIENCE PHARAO/ACES ET L'EFFET ALLAIS

L'éclair de lucidité d'Amar Djema, mentionné plus haut, fut justement d'apercevoir la possibilité d'obtenir des résultats expérimentaux des horloges à atomes froids tout à fait analogues, sinon parfois supérieurs, à ceux des pendules. Il croit que si une éclipse solaire provoque une sorte d'incidence sur un pendule de Foucault, cela soulève d'importantes questions sur la nature de ces phénomènes. Mais avant de déterminer la cause de l'effet Allais et les conséquences possibles [10, 11], les scientifiques doivent d'abord trancher la question de savoir si un pendule agit réellement différemment durant une éclipse solaire et s'il y a bien des perturbations gravitationnelles. À cet égard, il apporte deux suggestions prometteuses, l'une concernant l'éclipse solaire, l'autre l'éclipse lunaire :

Puisque l'ensemble Pharao comprend un lien de transfert de temps dans le domaine micro-onde qui permettra des comparaisons entre les horloges à bord et les horloges existant au sol − la précision de ce transfert est deux ordres de grandeur au-delà des performances actuelles des systèmes GPS −, il serait possible de synchroniser deux horloges à atomes froids à terre (dont l'une témoin) avec Pharao, et vérifier à nouveau la synchronisation après le passage d'une éclipse solaire. Une différence de potentiel gravitationnel terrestre en ces moments-là pourrait bien indiquer une variation de la constante fondamentale G et ainsi une physique au-delà du modèle standard.

Une autre manipulation, avance-t-il, consisterait en des tirs de solitons qui font l'aller-retour vers la Lune au moment d'une éclipse lunaire, et avec la mesure de la durée de leur trajet à l'aide d'une horloge à atomes froids au sol, une légère variation de la taille et donc de la gravité sur la Lune peut être détectée. L'avantage d'utiliser des solitons plutôt que des impulsions classiques réside dans le fait que le soliton est une onde solitaire qui se propage sans se déformer dans un milieu non-linéaire et dispersif [12]. Cependant, le problème du bruit thermique et sismique à de telles précisions doit être étudié et considéré.

En fin de compte, la meilleure manière de s'assurer que l'effet Allais existe ? Ce serait évidemment de le détecter avec l'horloge spatiale Pharao. Les fontaines atomiques qui embrassent les raffinements de la technologie moderne ne demandent qu'à sortir des laboratoires pour le débusquer. On tient une anomalie intrigante dont la présence contredit la théorie de la relativité et il devient urgent de faire appel à des scientifiques forts en matière d'ingéniosité technique et qui comprennent les enjeux − tels ceux qui font partie du projet Pharao/Aces − pour effectuer des expériences qui conduiront à une validation directe de l'effet Allais. Ou son invalidation, pour en finir ! Si les perturbations durant les éclipses existent et recèlent des informations uniques sur le comportement de la gravité, il faudra bien employer des équipes bien décidées à les dénicher − car en astrophysique comme ailleurs, le diable niche dans les détails −, et la résolution de ce mystère passera par une nouvelle physique. Une chose est sûre, le jeu en vaut la chandelle.

RÉFERENCES

[1] Kenneth Nordtvedt, *De la Terre à la Lune, au centimètre près*, La Recherche, Dossier N° 18, 24, février-avril (2005).
[2] Albert Einstein*, Annalen derPhysik,* 23, 197, (1907).
[3] Stéphanie Ruphy, Jean-Marc Lévy-Leblond, *De la gravitation au graviton*, La Recherche, Dossier N° 18, 32, 33, 34, 35, février-avril (2005).
[4] Laurent Nottale, *L'Univers et la Lumière*, Champs Flammarion, 46, 47 (1997).
[5] Nigel Calder, *Einstein's Universe*, Penguin Books Ltd, 137 (1980).
[6] Maurice Allais, *L'Anisotropie de l'Espace*, Edition Clément Juglar, p.162, 166 (1997).
[7] P. Delva, F. Meynadier, P. Wolf, C. Le Poncin-Lafitte, P. Laurent, *Time and frequency transfer with a microwave link in the ACES/PHARAO mission*, arXiv:1206.6239v1 [physics.space-ph] 27 Jun 2012.
[8] L. Cacciapuoti, N. Dimarcq, C. Salomon, *The ACES Mission: Scientific Objectives and Present Status*, Sixth International Conference on Space Optics, Edited by A. Wilson. ESA SP-621. European Space Agency, 2006.
[9] Phil McKenna, *July eclipse is best chance to look for gravity anomaly*, New Scientist, 07-19 (2009).
[10] Russell Bagdoo, *Concordance de l'effet Allais et du résidu d'arc de la Relativité Générale durant l'éclipse solaire*, Scribd, Issuu (2010), General Science Journal (2011).
[11] Russell Bagdoo, *L'augmentation de l'unité astronomique est-elle causée par l'effet d'éclipse Allais ?* Issuu, Scribd (2010), The General Science Journal (2011).
[12] Rita G. Lerner, George L. Trigg, *Encyclopedia of Physics*, VCH Publishers. Inc, 1154-1155 (1990).

Remerciements à Amar Djema. Ce papier n'aurait pas été écrit sans ses suggestions.